

朱敦伦 周汉民 强颖怀 编著

*Jixie  
Lingjian*

# 机械零件失效分析



*Shixiaofenxi*

中国矿业大学出版社

# 机械零件失效分析

朱敦伦 周汉民 强颖怀 编著

中国矿业大学出版社

(苏)新登字第 010 号

### 内 容 简 介

本书主要应用金属材料学、力学及金属的断口分析和裂纹分析的观点和方法,系统地介绍了机械零件在使用过程中发生的断裂、磨损、腐蚀三大失效形式的形貌特征、影响因素、预防措施及具体的分析方法,对于机械零件在加工制造过程中产生的各种缺陷及其对失效形式的影响也作了简要而系统的介绍。

本书可供从事金属材料研究、机械产品设计、制造、使用、维护维修、失效分析及质量管理等有关工程技术人员、技术工人使用,也可供高等工科院校金属材料及热处理、金属热加工、矿业机械、机械设计、制造等专业师生参考,并可作为高等院校金属材料失效分析有关课程及各种失效分析短训班的教材或教学参考书。

责任编辑 安乃隽 朱守昌

### 机械零件失效分析

朱敦伦 周汉民 强颖怀 编著

---

中国矿业大学出版社出版

新华书店经销 中国矿业大学印刷厂印刷

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 11.75 字数 286 千字

1993 年 12 月第一版 1993 年 12 月第一次印刷

印数 1~1000 册

---

ISBN 7 - 81021 - 706 - 2

---

TH · 22

定价: 6.95 元

# 前 言

机械零件的失效直接关系到产品的使用寿命及工程的安全,一些重大的失效事件往往导致人身伤亡和财产的巨大损失。人们从长期的生产实践中认识到,必须系统地研究机械零件的失效形式、影响因素、分析的方法、改进和预防的措施,才可望在创造优质产品、增加经济效益及确保工程安全方面获得成功,并在这方面积累丰富的经验。

目前,机械产品的失效分析已发展成为一门跨学科的、实用性很强的综合技术,在一些工业发达国家已作为一门独立的学科加以研究和发展。我国的失效分析工作,在中国机械工程学会材料学会的指导下,近十余年来有了很大的发展。从1980年开始,每四年召开一次全国性机械产品失效分析学术会议,并组织失效分析专家编写出版了《机械产品失效分析》丛书,成立了失效分析工作委员会,经常组织专业队伍对发生的重大失效事件进行分析等等。这些工作对于普及失效分析基本知识、提高失效分析的技术水平、壮大失效分析专业队伍做出了巨大贡献,使失效分析工作在我国国民经济的发展中发挥了越来越重大的作用。

本书是作者根据多年来从事失效分析工作所积累的大量技术资料 and 实践经验,并在多方面的支持与协助下编写的。全书共分八章,第一章为失效分析的基础知识,着重介绍了失效分析的方法与思路;第二、三、四章重点介绍断裂失效分析;第五、六章分别介绍了磨损失效分析及腐蚀失效分析;第七章介绍了加工制造缺陷与零件的失效;第八章介绍了几类典型零件失效分析的实例,作为上述各章基本内容的具体应用。本书初稿曾作为中国矿业大学《失效分析基础》教材试用五年,作为江苏省材料、机械及冶金系统工程技术人員《设备管理短训班》培训教材试用十余期。在多年的教学实践中,不断修改、补充、提高、完善。现由中国矿业大学出版社正式出版,希望这本书能对广大读者有所帮助,并能基本满足本课程教学改革的需要。

本书由朱敦伦主编。前言、第一、二、三、四章由朱敦伦编写,第六、七章由周汉民编写,第五章由强颖怀编写,第八章由朱敦伦、周汉民、王温银、孙智、付仁利、魏中国编写。由朱守昌高级工程师、倪振尧教授主审。

本书在编写过程中,得到中国机械工程学会失效分析工作委员会和江苏省失效分析专家委员会领导及专家的关注和鼓励,付仁利、王温银两同志参加了部分章节及图片的整理工作。本书引用和参考了许多工厂、研究单位和学校的有关资料与图片,借此机会,谨向在编写过程中给予帮助的单位和个人致以诚挚的谢意!

由于编著者水平有限,缺点错误之处一定不少,欢迎各界读者批评指正。

编著者 1993.8.20

# 目 录

|                              |       |
|------------------------------|-------|
| <b>第一章 失效分析基础</b> .....      | (1)   |
| 第一节 失效与失效分析.....             | (1)   |
| 第二节 失效分析的重要意义.....           | (7)   |
| 第三节 失效分析的现状与发展趋势 .....       | (11)  |
| 第四节 失效分析的方法及程序 .....         | (14)  |
| <b>第二章 断裂失效的类型及其特征</b> ..... | (24)  |
| 第一节 断裂失效的类型 .....            | (24)  |
| 第二节 过载断裂失效 .....             | (26)  |
| 第三节 疲劳断裂失效 .....             | (30)  |
| 第四节 材料致脆断裂失效 .....           | (39)  |
| 第五节 环境致脆断裂失效 .....           | (44)  |
| 第六节 混合断裂失效 .....             | (55)  |
| <b>第三章 断裂失效的断口分析</b> .....   | (57)  |
| 第一节 断口的处理及断口分析的任务 .....      | (57)  |
| 第二节 断口的宏观分析 .....            | (59)  |
| 第三节 断口的微观分析 .....            | (64)  |
| <b>第四章 断裂失效的力学分析</b> .....   | (76)  |
| 第一节 负荷形式与机械零件失效 .....        | (76)  |
| 第二节 应力集中与机械零件失效 .....        | (90)  |
| 第三节 残余应力与机械零件失效 .....        | (95)  |
| <b>第五章 磨损失效分析</b> .....      | (101) |
| 第一节 磨损及磨损失效.....             | (101) |
| 第二节 磨损失效的基本类型.....           | (102) |
| 第三节 磨损失效分析.....              | (110) |
| 第四节 磨损失效的预防措施.....           | (113) |
| <b>第六章 腐蚀失效分析</b> .....      | (119) |
| 第一节 腐蚀及腐蚀失效.....             | (119) |
| 第二节 腐蚀失效的基本类型.....           | (122) |
| 第三节 腐蚀失效分析及预防.....           | (131) |
| <b>第七章 金属零件加工缺陷与失效</b> ..... | (138) |
| 第一节 铸造加工缺陷与失效.....           | (138) |
| 第二节 锻造加工缺陷与失效.....           | (142) |
| 第三节 焊接加工缺陷与失效.....           | (146) |

|      |                          |       |
|------|--------------------------|-------|
| 第四节  | 热处理缺陷与失效·····            | (150) |
| 第五节  | 金属零件冷加工缺陷与失效·····        | (154) |
| 第八章  | 失效分析应用实例·····            | (158) |
| 例一   | 履带车辆扭力轴断裂原因分析·····       | (158) |
| 例二   | IHI 卧式连续离心机螺旋叶片断裂分析····· | (162) |
| 例三   | 3Cr2W8V 钢热挤压模具失效分析·····  | (165) |
| 例四   | 中轧机辊颈断裂原因分析·····         | (170) |
| 例五   | 锅炉再热器管断裂原因分析·····        | (172) |
| 例六   | 断线钳钳柄脆断原因分析·····         | (174) |
| 例七   | 余热锅炉过热器管爆管分析·····        | (177) |
| 参考文献 | ·····                    | (179) |

# 第一章 失效分析基础

## 第一节 失效与失效分析

### 一、失效

失效在英文中叫“Failure”，按词义可译成：“失灵”、“失事”、“故障”、“破坏”等。在国内有时俗称“损坏”、“事故”等。上述名词的含义有许多相似之处，所以常常混用。但是“事故”和“失效”却是两个不同的概念，应该区别开来。失效是产品原有功能状态的损坏，而事故是指产品的功能状态损坏后引起的后果。为防止混乱，在1980年12月召开的中国机械工程学会机械产品失效分析会议上，我国的学者正式统一称为“失效”。

按照国内外大多数学者通用的定义，所谓机械产品的失效，是指产品在使用中丧失其规定功能的现象<sup>[1]~[5]</sup>。按照产品在使用过程中原有功能丧失的程度，失效的具体含义包括以下三方面的内容：

- (1) 因损坏而完全不能工作；
- (2) 虽然能够工作，但不能完成规定功能；
- (3) 虽然能够工作，也能完成规定功能，但继续使用时，不能确保安全可靠性。

产品出现上述三种现象中的任何一种时，均被认为已经失效。由此可见。一个轴件发生断裂而完全丧失原有功能的现象，毫无疑问属于失效；但是有些产品，如机床主轴、轴承、齿轮等，因磨损、腐蚀等原因，使表面状态发生破坏，当其超过某一规定值时，将导致整机丧失其原有功能，对此也应认为该产品已经失效。除此之外，有些产品的整体功能并无任何变化，但由于某个部件、零件的损伤或疲劳，使其功能降低，此时的整机通常还能正常工作，但在某些特殊情况下可能出现突发性重大事故，这种使整机失去安全工作能力的现象也属于失效。例如，矿用提升机钢丝绳、航空发动机重要零部件、锅炉的安全阀的失效，均属此类失效。

### 二、失效的来源

失效经常是由多方面的原因造成的，其主要来源有以下几个方面：

#### (一) 设计上的缺点

有些失效是由设计上的缺点造成的，比如：

- (1) 在高应力部位存在有沟槽、机械缺口及圆角半径过小；
- (2) 应力计算方面的错误。对于结构比较复杂的零件，所承受的载荷性质、大小缺少足够的资料易引起计算方面的错误；
- (3) 设计判据不正确。由于对产品的服役条件了解不充分，设计判据的选用错误造成失效的事例也时有发生。例如，对于有脆断危险的零件，对交变载荷及带有腐蚀介质环境下工作的零件，仅以材料的拉伸强度和屈服强度指标，作为其承载能力的计算判据就很不可靠。这两个指标，除了对韧性断裂和全面屈服为其失效形式的情况外，在上述条件下，不仅不是

防止失效的判据,而且还会因为追求过高的材料强度而导致过早的失效。

## (二) 材料选择上的缺点

材料选择是产品设计中的组成部分,并直接涉及到产品的尺寸及形状。所以材料选择上的缺点也属于设计方面的问题。

### 1. 选材的判据有误

对于每种失效模式来说,均存在着特定的材料判据,即材料的特定性能指标。除此之外,还应权衡材料的成本、工艺性及工作寿命等因素,在选材时要进行通盘考虑。但目前并无通用的选材规则,多数情况下是凭经验进行选材。但对于特定的失效模式、载荷类型、应力状态及工作温度、介质等情况,有些规则是不能违背的,比如:

对于脆性断裂,其选材的通用判据应是材料的夏氏 V 型缺口转变温度、缺口韧性及  $K_{IC}$  韧性值;

对于韧性金属的韧性断裂,其通用判据应是拉伸强度及剪切屈服强度;

对于高周疲劳断裂,应以有典型应力集中源存在时的预期寿命的疲劳强度为其选材判据;

对于应力腐蚀开裂,选材的判据应是材料对介质的腐蚀抗力及  $K_{ISCC}$  等;

对于蠕变,应是在对应的工作温度和设计寿命中的蠕变率或持久强度。

材料选择比较困难的原因之一,是材料的实验室数据要推广应用到长期工作的使用条件下,由于对使用条件的模拟不准确而产生早期失效。

### 2. 材料中的缺陷

许多失效事故都是由于材料本身存在缺陷引起的。内部的和外部的缺陷起到缺口的作用而显著降低材料的承载能力。例如:

铸件中冷隔、夹杂、疏松、缩孔等;锻件中的折叠、接缝、空洞及锻造流线分布不合理等,使裂纹在此处易于产生和扩展或成为易腐蚀的部位;焊接残余应力、烧伤等缺陷也如此。

## (三) 加工制造及装配中存在的问题

加工方法不正确,技术要求不合理及操作者失误也是引起设备过早失效的重要原因。例如:冷变形、磨加工等产生的残余应力、微裂纹及表面损伤等,常常是导致失效的内在原因。

## (四) 热处理不当

热处理不当常见的有过热、回火不充分,加热速度过快及热处理方法选用不合理等。热处理过程中的氧化脱碳、变形开裂、晶粒粗大及材料的性能未达到规定要求等时有发生。

## (五) 酸洗及电镀

由于酸洗及电镀时引起对材料的充氢而导致的氢致损伤也是常见的失效形式。

## (六) 不合理的服役条件

不合理的起动和停车、超速、过载服役、温度超过允许值及异常介质的引入都可能成为设备过早失效的根源。

## 三、失效的类型及其分类

为了便于对失效现象进行研究和处理有关产品失效的具体问题,人们从不同的角度对失效的类型进行分类。

### (一) 按照产品失效的外部形态进行分类

在工程上,通常按照产品失效后的外部形态将失效分为过量变形、断裂及表面损伤三

类。

过量变形包括弹性变形、塑性变形、扭曲、高低温蠕变等。

断裂包括一次加载断裂、疲劳断裂及环境介质引起的断裂等。

表面损伤包括磨损、腐蚀等。

#### (二) 根据失效的诱发因素对失效进行分类

失效的诱发因素包括力学因素、环境因素及时间(非独立因素)三个方面。根据失效的诱发因素对失效进行分类,可分为:

机械力引起的失效,包括弹性变形、塑性变形、断裂、疲劳及剥落等;

热应力引起的失效,包括蠕变、热松弛、热冲击、热疲劳、蠕变疲劳等;

摩擦力引起的失效,包括粘着磨损、磨粒磨损、表面疲劳磨损、冲击磨损、微动磨损及咬合等;

活性介质引起的失效,包括化学腐蚀、电化学腐蚀、应力腐蚀、腐蚀疲劳、生物腐蚀、辐照腐蚀及氢致损伤等。

#### (三) 根据产品的使用过程对失效进行分类

一批相当数量的同一产品,在使用中通常会发现,一部分产品在短期内发生失效,另一部分产品要经过相当长的时间后才失效。如果将其失效率与使用时间做图,通常可以得到图1-1所示的规律。

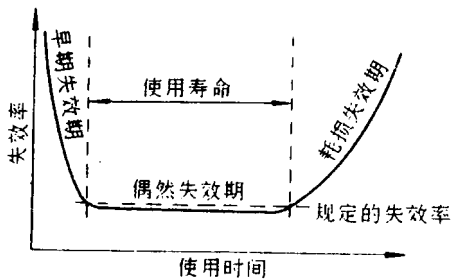


图 1-1 浴盆曲线<sup>[1]</sup>

由曲线可知,失效率按使用时间可分为三个阶段:早期失效期,偶然失效期和耗损失效期。

早期失效是产品使用初期的失效。这一时期出现的失效多系设计、制造或使用不当所致。

偶然失效是产品在正常使用状态下发生的失效。其特点是失效率低且稳定。这是产品的最佳工作时期,又称使用寿命,它反映产品的质量水平。

耗损失效是产品进入老龄期的失效。在通常情况下,产品发生的耗损失效生产厂可以不承担责任。但如果生产厂规定使用寿命过短,产品过早地进入耗损失效期,则仍属产品质量问题,应由生产厂家负责。

#### (四) 从经济法的观点对失效进行分类

在失效分析工作中,特别是对重大失效事故的处理上,往往涉及有关单位和有关人员的责任问题,此时对失效将从经济法的观点进行分类。通常可以分为以下几种类型:

产品缺陷失效,又称本质失效。是由产品质量有问题产生的早期失效。失效的责任自然应由产品的生产单位来负责;

误用失效。属于使用不当造成的失效。在通常的情况下应由用户及操作者负责。但如果产品的生产单位提供的技术资料中,没有明确规定有关的注意事项及防范措施,产品的制造者也应当承担部分责任;

受累性失效。属于它因失效。如火灾、水灾、地震等不可抗拒的原因导致的失效;

耗损失效。属于正常失效。生产厂一般不承担责任。但如果制造者没有明确规定其使用寿命并且过早地发生失效,制造者也要承担部分责任。

除此之外,对失效尚有许多其它的分类方法,如按照失效的模式(失效的物理化学过程)对失效进行分类,按失效零件的类型进行分类等。了解并正确运用失效的分类方法,对于研究失效的性质、分析失效的原因及确定相应的预防措施是十分重要的。上述分类方法在失效分析的实践中均得到广泛地应用并予以互相补充。

在运用上述知识对失效事件进行分析时,将失效的模式、失效的诱发因素及失效后的表现形式联系起来考虑,对于获得正确的分析结果是十分重要的。表 1-1 给出的大部分常见的失效模式与诱发因素及其表现形式间的对应关系,可供参考。当然实际情况还要更复杂一些。例如,同一种失效模式,可能不同的温度下发生。或者说在同一的诱发因素下可能出现不同的失效模式。另外,在分析失效的诱发因素时,除着眼于外部诱发因素外,材料的内在因素往往具有更为重要的意义,但它们大都比较隐蔽,一般属于需要探索的内容而非已知。所以在对失效分类时,通常不从材料的内在诱发因素出发进行分类。此部分的内容将在后面的有关章节中进行介绍。

表 1-1 失效模式、诱发因素及表现形式关系表<sup>[1]</sup>

| 序号 | 失效模式  | 外部诱发因素            | 表现形式      |
|----|-------|-------------------|-----------|
| 1  | 弹性变形  | 各种受力形式、高温         | 弹性变形、弯曲失稳 |
| 2  | 塑性变形  | 各种受力形式、高温         | 塑性变形、弯曲失稳 |
| 3  | 脆性断裂  | 拉、剪应力或冲击载荷,低温、热冲击 | 宏观脆性断裂    |
| 4  | 塑性断裂  | 拉、剪应力或冲击载荷、高温     | 宏观塑性断裂    |
| 5  | 疲劳    |                   |           |
| A  | 低周疲劳  | 交变塑性应变            | 断裂        |
| B  | 高周疲劳  | 交变应力              | 断裂        |
| C  | 热疲劳   | 交变温度              | 开裂        |
| D  | 接触疲劳  | 交变接触压应力           | 表层浅层剥落    |
| E  | 冲击疲劳  | 脉动冲击应力            | 断裂        |
| F  | 微振疲劳  | 微小振动              | 表面开裂      |
| G  | 腐蚀疲劳  | 交变应力+腐蚀介质         | 腐蚀及断裂     |
| 6  | 腐蚀    |                   |           |
| A  | 化学腐蚀  | 腐蚀介质              | 化学变化      |
| B  | 电化学腐蚀 | 电解质               | 化学变化      |
| C  | 缝隙腐蚀  | 电解质               | 化学变化      |
| D  | 点腐蚀   | 腐蚀介质              | 化学变化      |
| E  | 晶界腐蚀  | 腐蚀介质              | 化学变化      |
| F  | 浸出腐蚀  | 腐蚀介质              | 有成分变化     |
| G  | 冲蚀腐蚀  | 冲刷力+腐蚀介质          | 化学变化、表现剥离 |
| H  | 微振腐蚀  | 微小振动+腐蚀介质         | 表面开裂及腐蚀   |
| I  | 氢损伤   | 氢介质               | 断裂        |
| J  | 生物腐蚀  | 霉菌                | 化学变化      |
| K  | 应力腐蚀  | 拉应力+腐蚀介质          | 断裂及化学变化   |
| 7  | 磨损    |                   |           |
| A  | 粘着磨损  | 表面相对运动            | 表面损伤      |
| B  | 磨料磨损  | 硬质点研磨             | 表面损伤      |

续表 1-1

| 序号 | 失效模式   | 外部诱发因素          | 表现形式      |
|----|--------|-----------------|-----------|
| C  | 腐蚀磨损   | 硬质点研磨+腐蚀介质      | 表面损伤、化学变化 |
| D  | 疲劳磨损   | 交变接触压应力         | 表面剥离      |
| E  | 气蚀     | 瞬时冲击            | 表面剥离、物理变化 |
| F  | 冲击磨损   | 反复冲击            | 表层金属掉块    |
| G  | 咬合     | 匹配表面相对运动        | 咬死        |
| 8  | 蠕变     | 应力、高温、长时间       | 变形、断裂     |
| A  | 热松弛    | 应力、高温、长时间       | 变长        |
| B  | 应力断裂   | 应力、高温、长时间       | 断裂        |
| C  | 蠕变弯曲失稳 | 应力、高温、长时间、杆形件   | 塑性失稳      |
| D  | 蠕变疲劳   | 静应力、高温、长时间、交变应力 | 变形、断裂     |
| 9  | 辐射损伤   | 射线辐射、长时间        | 材质及性能变化   |

#### 四、失效分析

##### (一) 失效分析的目的及内容

失效分析通常是指对失效产品为寻找失效原因和预防措施所进行的一切技术活动。也就是说,它的主要目的是分析失效原因,经过采取有效措施,防止再次发生同类失效,此所谓狭义的失效分析。如果把管理的因素也包括在内,即为广义的失效分析。本书所涉及的内容主要是前者。狭义的失效分析按失效现象出现的前后所进行的分析,又可分为事前分析、事中分析和事后分析。

事前分析,主要采用逻辑思维方法(如故障树分析法、事件时序树分析法和特征—因素图分析法等),其目的主要是预防失效事件的发生。

事中分析,主要采用故障诊断与状态监测技术,用于防止运行中的设备发生故障。

事后分析,是采用实验检测技术与方法,找出某个系统或零部件失效的原因。我们通常所说的失效分析多指事后分析。本书所介绍的内容也侧重于后者。

##### (二) 失效分析工作的特点及与其它学科间的关系

失效分析学是人类长期生产实践的总结。与其它学科相比,它有两个显著的特点:一是实用性强,即它有很强的生产实用背景,与国民经济建设存在着密切关系;二是综合性强,即它涉及广泛的学科领域和技术部门。图 1-2 给出了失效分析学(失效学)与其它学科的关系。

从图 1-2 可以看出,失效学是以众多学科和技术为基础建立起来的一门新的多边缘学科。通过失效分析不但能十分有效地解决众多工程技术问题,而且促进了其它学科或技术的不断发展。例如,断口学和金相学是失效分析的重要基础,而失效分析中的有关结果又能充实这两个学科的内容,使其不断发展。图 1-2 中由双箭头所指示的学科,均具有互为基础而又互相促进的性质。

##### (三) 失效分析与废品分析

失效分析与生产现场所进行的废品分析在所涉及的专业知识、采用的思想方法及分析手段等方面,有许多共同之处。但是,二者在分析的对象、分析的目的及判断是非的依据等方

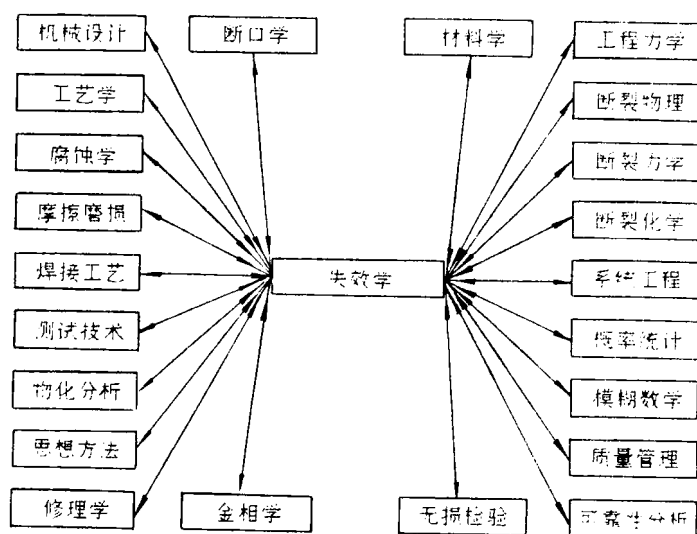


图 1-2 失效(分析)学与其它学科的关系

面是不同的。

失效分析的对象是在使用中发生失效的产品。这些产品通常是经过出厂检验合格的，即符合技术标准要求的产品（在个别情况下也有漏检的废品）。分析的主要目的是寻找失效的原因。漏检和技术标准不合理都可能是失效的原因，如果属于后者，则需对技术标准进行修改。

废品分析的对象是不符合技术标准的产品及半成品。它所讨论的问题是产品及半成品为什么不符合技术标准的要求。至于产品的技术标准是否正确则不属于废品分析要解决的问题。

在失效分析时应将二者区分开来。例如，在分析某零件发生断裂的原因时，不能简单地根据该产品的某项技术指标不符合标准要求，就作为判断失效原因的依据。这一结论可能正确也可能完全不正确。

**例** 模数为 7 的传动齿轮，采用 20CrMnTi 钢制造，经渗碳淬火并低温回火处理。技术要求是：渗碳层的硬度 58~63HRC，心部硬度 32~48HRC，马氏体及残余奥氏体 ≤ 4 级，渗碳层深度为 1.3~1.5mm。该齿轮在使用中发生断齿失效，试分析断齿原因。

**分析一** 按技术要求对该齿轮进行常规检查，其结果是：渗碳层硬度为 62HRC，心部硬度为 42HRC，马氏体及残余奥氏体为 3 级，均符合要求，但渗碳层深度为 1.1mm，不符合技术要求。对于这个齿轮，如果在出厂前发现硬化层深度低于技术要求而判为不合格品，这是无可非议的。但是现在要处理的问题是齿轮为什么发生断齿，那就不能简单地认定是硬化层深度不足而引起的。

**分析二** 按失效分析的观点，在进行上述常规检查后应作进一步分析。分析表明，断口为宏观脆性断裂（掉下的齿形呈凸透镜状），众多初裂纹源于表面加工缺陷处，经快速扩展后引起断裂，属过载类型的宏观脆性断裂。根据上述分析，该齿轮断齿失效是由于齿根加工质量不良产生的严重应力集中引起的。其改进措施应是提高齿根的加工质量、减少应力集中及防止过载。实践证明这一分析结论是正确的。按照分析一的观点，如果增加硬化层的深度至

1.3~1.5mm,虽然符合技术要求,但由于渗碳层的脆性进一步加大,不但解决不了此类断齿问题,而且会增加此类断齿的危险性。

## 第二节 失效分析的重要意义

### 一、失效分析的经济意义及社会效益

失效分析的巨大经济意义和社会效益是显而易见的。它主要表现在以下三个方面:

#### (一) 失效将造成巨大的直接经济损失

据化工部对全国 51 个中型合成氨厂的不完全统计,1971 年到 1979 年,共发生受压力容器重大失效事故 260 起,直接损失 5493.2 万元<sup>[7]</sup>,1973 年到 1983 年全国压力容器发生爆炸事故 1383 起,锅炉爆炸事故 957 起<sup>[8]</sup>。

据报导,美国 1982 年的统计表明,每年由于磨损、腐蚀和断裂失效造成的直接经济损失约为 3600 亿美元;1976 年日本由于腐蚀失效造成的直接经济损失 4 万亿日元,占当年国民经济生产总值的 3%<sup>[9]</sup>;联邦德国每年因摩擦磨损失效而造成的经济损失约 100 亿马克<sup>[10]</sup>;我国机械行业因腐蚀失效造成的直接经济损失约 300 亿人民币<sup>[11]</sup>,矿山机械因磨料磨损和腐蚀造成的直接经济损失约 10 亿人民币。

#### (二) 失效造成的间接损失

产品发生失效后,往往造成整机的破坏甚至整个企业的生产停顿,由此将造成更大的间接损失。例如:

1981 年 1 月 11 日某电厂 20 万 kW 机组除氧器发生爆炸,直接经济损失 500 万元,但损坏的机组抢修 10 个月,停发电引起的间接经济损失达几亿元;

某化工企业因贮罐爆炸停产一天损失 30 万元,建造一个贮罐又需 80 万元,这样停产一个月就遭受 900 多万元的损失;

某钢厂轧机的人字齿轮轴失效,引起的直接经济损失虽然并不太大,但停产造成的间接损失却高达 400 余万元;

小型合成氨厂所用的合成氨冷凝器,每台售价仅 7000 元,但因失效引起的损失可达数万元甚至数十万元。

除此之外,机械产品的失效除造成本企业的损失外,往往引起相关企业的停产或减产,其实际损失往往比估算的还要大。至于失效引起的人员伤亡事故,更是难以用经济数字来表示的。

#### (三) 质量低劣、寿命短造成巨大经济损失

一些量大面广的机械产品,由于质量低劣,使用寿命大大缩短,也将造成巨大的经济损失。

齿轮、轴承、弹簧、轴及紧固件、工模具等是机械工业的基础件。一个具体件的失效,往往并不造成多大的经济损失,但是由于量大、涉及面广且失效频繁,由此而造成的经济损失也是十分巨大的。

例如:第二汽车制造厂曾因零件早期失效或其它质量问题,仅仅 1986 年就向用户赔偿零件金额达 66 万元<sup>[12]</sup>;

80 年代,我国钢产量仅为日本的三分之一,而高速钢的消耗却为日本的三倍<sup>[13]</sup>,其重要

原因之一,就是工模具用钢不合理及工模具寿命低。热挤压用模具的寿命也有类似情况,国内不少厂家自制模具的使用寿命仅为日本进口模具的三分之一。

我国某露天矿矿车,仅挂钩和挂钩销的失效一项,每年的损失总额就高达 40~50 万元。

从上述事例中可以看到,机械产品的失效,不仅造成巨大的、直接的经济损失,而且会造成更大的、间接的经济损失及人员伤亡。重大的工程构件的失效是如此,许多量大面广的、往往不被人们注意的小型零件的失效也是如此。但是,无论是哪种类型的失效,通过失效分析,明确失效模式,找出失效原因,采取改正或预防措施,使同类失效不再发生,或者把产品的失效限制在预先规定的范围内,都可挽回巨额的经济损失并可获得巨大的社会效益。

## 二、失效分析促进产品质量的提高

产品在使用中发生的早期失效,有相当大的部分是因为产品的质量有问题。通过失效分析,将其失效原因反馈到生产厂并采取相应措施,将有助于产品质量的不断提高。这一工作是失效分析和预防技术研究的重要目的和内容。

由于钢材中过量氢的存在而引起的氢脆,促使真空冶炼和真空浇注技术的出现,从而大大提高了钢材的冶金质量。

不锈钢的晶间腐蚀断裂,可以通过降低钢中的含碳量或利用加钛和铌来稳定碳的办法予以解决。这些措施的提出,是由于失效分析发现,不锈钢的晶间腐蚀是由于碳化物沿晶界析出引起的。

有些产品在加工制造中留下了较大的加工刀痕,在以后的服役过程中,疲劳源就在此处产生,从而导致早期断裂。例如:某造纸厂的三台 250kg 打浆机主轴,直径为 108mm,使用不到一年,三个主轴相继断裂,经分析均是由于表面加工刀痕过大引起的。某厂生产的一批机枪,使用时发生断裂,经分析均是由于圆角过渡不够引起的,原设计要求圆角半径为 5mm,实际半径不到 3mm,断裂就发生在圆角半径不够的地方。利用有限元法和光弹性力学分析得知,圆角半径为 3mm 时的应力相当于 5mm 时的 2 倍以上。将圆角半径加大后就不再发生这类断裂,从而避免了 150 万元的直接经济损失。

某坦克厂生产的扭力轴,长期存在着疲劳寿命不高的质量问题。该厂曾多次改进热处理工艺及滚压强化措施未能得到显著效果。后来利用失效分析技术,发现疲劳寿命不高的主要原因是钢中存在过量的非金属夹杂物引起的,将此信息反馈到冶金厂,通过提高冶金质量,使扭力轴的疲劳寿命由原来的 10 万次左右提高到 50 万次以上<sup>[14]</sup>。

目前,日本的某些产品在国际市场有很大的竞争力,比如日本的汽车冲击着整个世界市场,其实早在 60 年代初期,日本就对各国生产的汽车,特别是关键的零部件进行分析并加以比较,为改进本国的产品提供了科学的依据,从而很快地进入世界先进行列。

## 三、失效分析有助于提高管理水平

有些产品在使用中之所以会失效,常常是由于产品本身有缺陷,而这些缺陷在大多数情况下在出厂前是可以由相应的检查手段予以发现的。但是由于出厂时漏检而进入市场,这就表明工厂的检验制度不够完善或者检验的技术水平不够高。

1979 年我国共发生压力容器爆炸事故 188 起,通过失效分析得知,仅就使用中因管理不善而造成的事故约占 2/3。如果将生产中的管理不善(如粗制滥造)包括进去则更为明显。

又如,某电厂 20 万千瓦机组锅炉再热器管道在焊接接头处发生断裂事故,经分析发现,此次断裂事故是由焊缝处的再热裂纹在外力作用下进一步扩展引起的。按规定再热器管路

焊接接头应进行 100% 的探伤检查,此裂缝因漏检而进入用户,表明生产厂在产品的质量管理方面有待于改进。

#### 四、失效分析有助于分清事故责任和保护用户利益

对重大事故,必须分清责任。为了防止误判,必须依据失效分析的科学结论进行处理。例如,某军工厂一重要产品在锻造时发生成批开裂事故,开始主观地认为是操作工人有意进行破坏并进行了处分,后经分析表明,锻件开裂的原因是由铜脆引起的,并非人为的破坏,从而避免了一起冤案。又如,某煤矿厂扒装机减速器上的行星齿轮采用 45 钢制造,齿轮在井下使用仅月余就因严重磨损而报废,为了更换该齿轮,须将减速器卸下送到机修厂检修,一般需停产 4~5 天,造成很大损失。失效分析发现,该齿轮并未按要求进行热处理。

#### 五、失效分析为进出口产品的索赔与反索赔提供依据

对于进口产品存在的质量问题,及时地进行失效分析,则可向外商进行索赔,以维护国家的利益。例如,某磷肥厂由国外引进的价值几十万元的设备,使用不到 9 个月,主机叶片发生断裂。将此事通知外商后,外商很快返回了处理意见:认为是操作者违章作业引起的应力腐蚀断裂。该厂在使用中的确存在着 PH 值控制不严的问题,而叶片的外缘部位也确实有应力腐蚀现象,看来事故的责任应在我方。但进一步分析表明,此叶片断裂的起裂点并不在应力腐蚀区,而发生在叶片的焊缝区,是由焊接质量不良(有虚焊点)引起的。依此分析与外商再次交涉,外商才承认产品质量有问题,同意赔偿损失<sup>[15]</sup>。

#### 六、失效分析是修订产品技术规范及标准的依据

随着科学技术水平的不断提高及生产的不断发展,要求对原有的技术规范及标准作出相应的修订。各种新产品的试制及新材料、新工艺、新技术的引入也必须及时制订相应的规范及标准。这些工作的正确进行,都需依据产品在使用条件下所表现的行为来确定。如果不了解产品服役中是如何失效的,不了解为避免此种失效应采取的相应措施,原有规范和标准的修订及新标准的制订将失去科学的依据。这对确保产品质量的不断提高是不利的。

例如:某车辆重负荷齿轮,原来采用固体渗碳处理,其渗碳层的深度、硬度及金相组织等均有相应的技术要求。但在使用中发现产品的主要失效形式为齿根的疲劳断裂。为了提高齿根的承载能力改进了渗碳工艺并加大了齿轮的模数,该齿轮的使用性能得以显著提高。当对产品的性能提出更高要求时,齿轮的主要失效形式为齿面的粘着磨损及麻点剥落。为此,试制了高浓度浅层碳氮共渗表面硬化工艺,该齿轮的使用寿命又有大幅度的提高。在老产品的改型及新工艺的引入过程中,产品的技术规范和标准多次作了修改。由于此项工作始终是以产品在使用条件下所表现的失效行为为基础的,所以确保了产品的性能得以稳定和不断提高。相反,如果老的规范及标准保持不变,就会对生产的发展起到阻碍作用,但在产品的技术规范 and 标准变更的过程中,如果不以失效分析工作为基础,也很难达到预期的结果。

#### 七、失效分析促进材料科学的不断发展

失效分析在近代材料科学的发展史上占有极为重要的地位。可以毫不夸张地说,材料科学的发展史实际上是一部失效分析史。在近代材料科学的发展过程中,疲劳与疲劳极限、氢脆与应力腐蚀、断裂力学与断裂韧性概念的提出及有关学科的建立和发展,是具有里程碑意义的三大事件。下面仅以此对失效分析的科学意义作一简单介绍<sup>[1][3][16]</sup>。

##### (一) 金属的疲劳及疲劳抗力概念的提出

近代机械工业中的许多金属构件,在工作中承受交变载荷的作用,构件在交变载荷(应

力)的作用下,发生损伤及断裂的现象称为金属的疲劳。表征金属材料抵抗疲劳破坏能力的特征参量有疲劳极限、疲劳强度及裂纹扩展速率等。金属的疲劳概念及理论研究成果已成为机械设计、材料选择的基础。可以说,没有金属疲劳学科的理论与实践,就没有近代的机械工业。而金属的疲劳及疲劳抗力概念的提出,又是以失效分析工作的开展为其前提条件的。

19 世纪初,随着铁路运输业的兴起,人们的生产活动和生活发生了巨大的变化。但随后发生了一系列的车轴断裂的重大事故,给人们的生命安全及财产造成极大的威胁和损失。当时,英国每年死于车轴断裂事故者不下 200 人,有的铁路局长和工程师被判成杀人罪。于是英国皇家学院悬赏对此攻关。科学家和工程师们对大量车轴断裂事故的分析发现,金属材料在交变应力作用下,即使该应力远低于金属的强度极限,甚至低于屈服极限,经过一定的循环周次工作后,也会发生断裂。依此,1839 年 J. V. Poncelet 首先提出了金属材料的“疲劳”概念。这在当时,是一个了不起的理论突破。随后,德国科学家 A. Wönlér 通过大量实验,提出了在对称循环条件下新的材料指标——疲劳极限<sup>[17]</sup>。用它来代替原来的材料静载指标表示材料抵抗疲劳断裂的能力,并将它作为承受交变载荷作用下构件的强度计算指标,从而解决了车轴的断裂问题。J. Goodman 在试验的基础上建立了考虑平均应力的疲劳等寿命图,解决了非对称条件下零件的疲劳设计问题<sup>[18]</sup>,从而开辟了材料科学的新领域——金属的疲劳及疲劳抗力。

## (二) 氢脆与应力腐蚀

在第一次世界大战期间,随着飞机制造业的发展,高强度金属材料相继出现并用于制造各类重要构件,但随后发生的多次飞机坠毁事件给高强度材料的广泛应用造成了威胁。失效分析发现,飞机坠毁的原因是构件中含有过量氢而引起的脆性断裂。含有过量氢的金属材料,其强度指标并不降低,但材料的脆性大大增加了,故称为氢脆。这一观点是我国金属学家李薰等人首先提出的。50 年代美国发生多起电站设备断裂事故,也被证实是由氢脆引起的。

对于许多大型化工设备不锈钢件的断裂原因分析发现,具有一定成分和组织状态的合金,在一定的腐蚀介质和拉应力作用下,可能出现有别于单纯介质和单纯拉应力作用下引起的脆性断裂,此种断裂称为应力腐蚀断裂。此后,氢脆和应力腐蚀逐步发展成为材料断裂学科中另一重大领域而被广泛重视。

## (三) 断裂力学与断裂韧性

目前以断裂力学(损伤力学)和材料的断裂韧性为基础的裂缝体强度理论,被广泛应用于大型构件的结构设计、强韧性校核、材料选择与剩余寿命估算,因而成为当代材料科学发展中的重要组成部分。这一学科的建立和发展也与机械失效分析工作有着密切的关系。

金属构件的早期强度设计,是以宏观强度理论为基础进行的,在一般情况下,这种设计还是安全的。但是宏观强度理论没有充分考虑到构件在加工制造、安装和使用过程中不可避免地存在尖角、切口、沟槽及大块夹杂物等问题。因而,在许多情况下并不能保证构件的安全使用。于是连续发生按照传统的设计观点不能解释的重大工程事故。在这些事故中,低碳钢材的低应力断裂和高强度钢材的低应力断裂尤为突出。

低碳钢材广泛用于制造各种金属构件,如船体结构、压力容器、桥梁结构及矿山机械等。这类构件在使用中发生的低应力断裂事故,一度是十分惊人的。例如,在第二次世界大战期间,美国生产的 5000 艘焊接货轮,在 1942~1946 年期间发生断裂事故的达 1000 艘。1946~1952 年发生严重断裂事故而完全报废的有 200 艘<sup>[19][20]</sup>。1943 年 1 月刚刚经过试航的美国

T-2 号油轮,停泊在纽约港,突然一声巨响,自行断裂为二。当时甲板的工作应力仅为 70MPa 远低于材料的屈服极限<sup>[21]</sup>。低碳钢材的塑性是很好的,但令人费解的是,上述断裂是真正的宏观脆性断裂,实际断裂应力远低于材料的屈服极限。

第二次世界大战后,随着宇航事业的发展,高强度、超高强度材料的应用日益广泛。由这类材料制造的构件,在使用中也经常发生实际的(名义的)应力远低于材料屈服极限的宏观脆性断裂。例如,在 50 年代初,美国北极星导弹固体燃料发动机壳体在实验时发生爆炸。壳体所用材料为屈服强度 1400MPa 的高强度材料,其韧性经过检验也是良好的。

通过失效分析发现,上述两类构件中均存在宏观裂纹,爆炸是由裂纹扩展引起的。例如,上述壳体的爆炸,是由材料中存在 0.1~1.0mm 的裂纹扩展的结果。1945 年至 1948 年美国国家标准局,通过对焊接船体的断裂原因分析与研究发现,当温度降低时,低碳钢材存在一个无塑性转折温度(NDT),构件中微观裂纹的存在,将使这一转折温度向高温方向推移。在低于此温度下发生的断裂均为脆性的低应力断裂,并确定了该温度的却贝 V 型缺口试验的临界值为 15 英尺·磅。为预防这类钢材的低温脆断奠定了理论基础。

一系列大型断裂事故的分析表明,不能再以宏观强度理论为基础来设计和估算构件的承载能力了,而必须立足于裂缝存在的前提下,对待这类构件的断裂问题,从而形成了一门新型的学科——断裂力学,并提出了一个新的材料特征参量——断裂韧性。

总之,失效分析这门综合性技术是现行质量规范和标准适用性的实地检验,是发展新产品、新材料、新技术及新学科的源泉,是制订科技发展规划和重大经济决策的重要依据。

### 第三节 失效分析的现状与发展趋势

任何机械产品在使用中都有一定的失效概率,而失效的结果往往又是十分危险和严重的。但是有许多失效通过科学的分析,又是可以减少或完全避免的。因此,世界各国,特别是工业发达国家,在这方面做了大量工作,培养了大批失效分析的专门人才,积累了丰富的分析经验。

#### 一、国外的失效分析工作<sup>[23][24]</sup>

国外的失效分析工作有以下几方面的特点:

##### (一) 建立了比较完整的失效分析机构

在西德,失效分析中心主要建在联邦及州立的材料检验中心。西德的 11 个州共建立了 523 个材料检验站,分别承担各自富有专长的失效分析任务。工科大学的材料检验中心,在失效分析技术上处于领先地位和权威单位。例如,斯图加特大学的材料检验中心,有技术人员 300 人,面积 12000m<sup>2</sup>,每年的经费 2 亿马克,它的主要任务是负责电站,特别是核电站、压力容器及管道的安全可靠性问题。阿里盎兹技术保险公司有专门从事失效分析的技术队伍达 340 人,每年的经费约 100 万马克。专门研究损失在 10 万马克以上的事故,以降低保险范围内的失效概率。每个企业和公司均有专门从事失效分析的研究机构。例如,西德的奔驰汽车公司,为了同日本汽车业相抗衡,建立了先进的疲劳试验台和振动台,对于重要零、部件及整机进行破坏性试验。为了进行事故现场的侦察和分析,还备有流动车辆,以便及时判断事故原因。

在日本,国立的失效分析研究机构有金属材料技术研究所、产业安全研究所和原子力研